



Ricerca di Sistema elettrico

Progetto di un sistema di bobine per il trasferimento di potenza dinamico senza contatto

Rosanna Pinto, Vanni Lopresto

PROGETTO DI UN SISTEMA DI BOBINE PER IL TRASFERIMENTO DI POTENZA DINAMICO SENZA CONTATTO

Rosanna Pinto, Vanni Lopresto (ENEA)

Settembre 2016

Report Ricerca di Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico - ENEA

Piano Annuale di Realizzazione 2015

Area: Efficienza energetica e risparmio di energia negli usi finali elettrici ed interazione con gli altri vettori energetici

Progetto: Mobilità elettrica sostenibile

Obiettivo: Trasporto pubblico con ricarica wireless dinamica

Responsabile del Progetto: Antonino Genovese - ENEA

Indice

SOMMARIO.....	4
1 INTRODUZIONE.....	5
2 DESCRIZIONE DELLE ATTIVITÀ SVOLTE E RISULTATI.....	6
2.1 SPECIFICHE DI PROGETTO	6
2.2 DIMENSIONAMENTO DEL FILO DI LITZ	8
2.3 STUDIO DI UN CASO CANONICO	9
2.4 DDcoil.....	10
2.4.1 <i>Analisi sul numero di avvolgimenti</i>	11
2.4.2 <i>Analisi sull'effetto della distanza tra DDcoil e strato di ferriti</i>	11
2.4.3 <i>Ottimizzazione della geometria con barre di ferrite</i>	12
2.4.4 <i>Scelta della geometria ottimale</i>	16
2.5 ANALISI DEL SISTEMA COMPLETO	17
2.5.1 <i>Analisi circuitale del sistema LITZ-custom</i>	18
2.5.2 <i>Analisi circuitale del sistema LITZ-standard</i>	19
3 CONCLUSIONI.....	20
4 RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI	20
5 ABBREVIAZIONI ED ACRONIMI.....	21

Sommario

I sistemi di ricarica dinamica per veicoli elettrici rappresentano una sfida tecnologica molto promettente per lo sviluppo di una reale mobilità ad impatto zero. In uno scenario futuribile è possibile prevedere la disponibilità di strade ‘elettrificate’, in grado di fornire ai veicoli elettrici la potenza necessaria alla trazione durante il movimento. In una realtà più prossima, è possibile ipotizzare dei percorsi ‘elettrificati’, in cui la batteria in dotazione sia ricaricata durante il percorso, aumentando l’autonomia dei veicoli e diminuendo così il peso delle batterie. Il trasferimento di potenza senza contatto avviene attraverso un accoppiamento magnetico ad alta frequenza (dell’ordine di decine di kHz) tra il sistema a terra e quello a bordo: nel caso della ricarica dinamica questi sistemi devono avere ampie tolleranze, distanze fra i sistemi a terra e a bordo di alcune decine di centimetri, e costi di realizzazione accettabili; inoltre, devono essere robusti e rispettare i limiti di protezione dall’esposizione della popolazione ai campi elettromagnetici fissati dalle linee guida internazionali e dalla legislazione nazionale [1-3].

Nel corso di questa annualità, l’Università di Padova ha analizzato le caratteristiche operative, funzionali e progettuali dei sistemi di ricarica dinamica senza contatto, realizzando un progetto di massima di un prototipo operante alla frequenza di 85 kHz. Uno dei risultati delle analisi condotte è stato la definizione delle specifiche per le bobine di trasmissione e ricezione della potenza. La topologia ottimale di bobine identificata è quella DD (anche detta DD-coil) [4]. L’attività di ricerca del gruppo di bioelettromagnetismo del dipartimento SSPT dell’ENEA, oggetto del presente rapporto, ha riguardato il progetto di bobine soddisfacenti le specifiche richieste. A questo scopo è stato utilizzato un codice di calcolo che implementa il metodo di calcolo agli elementi finiti per la simulazione elettromagnetica. L’analisi, finalizzata alla ricerca della geometria ottimale per il sistema, è passata attraverso il dimensionamento del filo di Litz in funzione delle correnti in gioco (circa 130 A di corrente massima sulla bobina di trasmissione), la scelta del numero di avvolgimenti del cavo e lo studio dell’effetto delle ferriti sull’impedenza della struttura. Alla fine si sono trovate due strutture ottimali con le quali è stata eseguita l’analisi dell’intero sistema, costituito da tre bobine a terra affiancate tra di loro, e una bobina in aria che scorre sopra di esse. Per entrambi i modelli, la mutua induttanza complessiva risulta non essere mai inferiore a 9 μH , garantendo il trasferimento di potenza per ogni punto dello scorrimento. Anche le induttanze dei singoli sistemi DD-coil rimangono invariate, a meno di piccole oscillazioni fisiologiche dovute alle variazioni della geometria. Con l’analisi circuitale dei due sistemi scelti si sono identificati e quantificati i parametri circuitali che ne rendono possibile il funzionamento in condizioni di risonanza alla frequenza di 85 kHz.

I due sistemi per la ricarica senza contatto progettati rispettano le specifiche richieste; nelle annualità successive il prototipo del sistema verrà realizzato in laboratorio e montato su un autoveicolo per una verifica sperimentale su strada.

1 Introduzione

Le modalità di trasporto convenzionali si affidano ancora, in larghissima parte, ai motori a combustione interna. Purtroppo, l'attenzione globale verso i cambiamenti climatici (Cop 21 2015) e la maggiore sensibilità alle tematiche di inquinamento urbano hanno aumentato l'aspettativa di una reale mobilità a 'impatto zero', rendendo i veicoli elettrici molto più attraenti che in passato. I limiti, non solo tecnologici, che ancora caratterizzano le batterie (pesantezza, capacità di accumulo, costi e rischi di esplosione in caso di incidenti), rappresentano l'ostacolo maggiore a una diffusione capillare di questo tipo di veicoli per il trasporto pubblico e privato. Stessa cosa dicasi riguardo i tempi di ricarica delle batterie, che risultano essere ancora non competitivi rispetto ai motori a combustione. Altri aspetti, come la leggerezza e la robustezza dei motori, l'efficienza e la compattezza degli inverter e vari problemi di trasmissione, non sono più problemi di tipo tecnologico bensì di tipo economico. Si può quindi affermare che l'innovazione delle batterie e dei metodi di ricarica sono fondamentali per lo sviluppo e la commercializzazione futura dei veicoli elettrici. In questi anni, diverse case produttrici hanno sviluppato diversi tipi di veicoli elettrici, a batteria pura [5], ibride [6], ibride plug-in [7], a sostituzione di batteria [8], con sistemi di ricarica dinamica [9]. Queste ultime, in una situazione ideale che fossero disponibili strade 'elettrificate', non avrebbero bisogno di sistemi di accumulo a batteria, in quanto sarebbero in grado di prelevare la potenza necessaria alla trazione direttamente dalla strada durante il movimento. Nella realtà, è possibile ipotizzare dei percorsi 'elettrificati' in cui la batteria sia ricaricata durante il percorso, ottenendo il duplice vantaggio di aumentare l'autonomia dei veicoli e di diminuire il peso delle batterie stesse. Per questi motivi, i veicoli elettrici con sistemi di ricarica dinamica sono candidati promettenti per future piccole auto, taxi, bus, tram e mezzi per trasporti di merci. La più grande sfida alla commercializzazione di questi tipi di veicoli è rappresentata dalla possibilità di trasmettere potenze elevate con sistemi di ricarica dinamica che siano efficienti, economici e sicuri. Questa sfida è tanto più aperta, dal punto di vista delle possibili soluzioni tecnologiche, nel caso in cui il trasferimento di potenza dalla strada al veicolo avviene senza contatto.

Gli studi sui sistemi di ricarica dinamica senza contatto (SRDSC) sono iniziati negli anni '80 [6-7], ed hanno portato allo sviluppo di diversi sistemi per il trasferimento di potenza senza contatto (STPSC).

In generale, i STPSC sono composti da due sub-sistemi: 1) il sistema su strada che include il rettificatore, l'inverter ad alta frequenza, il banco primario di capacità e il 'binario' che trasferisce la potenza; 2) il sistema sul veicolo, che riceve la potenza, costituito da una bobina di ricezione (pick-up coil), un banco secondario di capacità, un rettificatore e un regolatore per la batteria. Il sistema su strada deve essere robusto ed economico per poter elettrificare distanze significative; il sistema a bordo deve soprattutto avere dimensioni compatte ed essere leggero. Il trasferimento di potenza senza contatto avviene attraverso un accoppiamento magnetico ad alta frequenza (dell'ordine di decine di kHz) tra il sistema a terra e quello a bordo, grazie a dei sistemi per il trasferimento di potenza induttivi [10-15]. Questi sistemi sono utilizzati normalmente per la ricarica statica senza contatto; tuttavia la ricarica dinamica richiede delle specifiche aggiuntive quali tolleranze più ampie, distanze fra i sistemi a terra e a bordo maggiori, e costi inferiori di realizzazione. Questi sistemi devono essere inoltre più resistenti, soprattutto per quel che riguarda la parte su strada, esposta a stress meccanici, e fenomeni atmosferici e rispettare i limiti di protezione dall'esposizione della popolazione ai campi elettromagnetici fissati dalle linee guida internazionali e dalle normative.

Gran parte della ricerca sui SRDSC e i fondamenti degli sviluppi tecnologici in questo ambito possono essere ascritti al progetto OLEV (on-line electric vehicle) [13] iniziato nel 2009 in Corea e che ha portato alla realizzazione di una serie di sistemi per auto (prima generazione), bus (seconda generazione), SUV, bus e treni (terza generazione) e di nuovo bus (quarta e quinta generazione), ottenendo di volta in volta un aumento dell'efficienza (fino a circa l'80%) e una diminuzione dei costi (un terzo rispetto ai primi prototipi). Purtroppo, ampi spazi di ricerca sono ancora aperti e tanti sono ancora i problemi da risolvere, specie per quel che riguarda il progetto, la realizzazione e la caratterizzazione dei SRDSC per auto elettriche adibite al trasporto privato. Nel corso di questa annualità, il gruppo del Prof Buja afferente al Dipartimento di Ingegneria Industriale dell'Università di Padova ha analizzato le caratteristiche operative, funzionali e progettuali dei SRDSC, tenendo conto delle differenze rispetto ai sistemi di ricarica statici, che sono sia di

tipo sistemico che di tipo componentistico. Il progetto di massima dell'intero prototipo è oggetto del rapporto tecnico prodotto per questa annualità dall'Università di Padova. Uno dei risultati delle analisi condotte è stata la definizione delle specifiche per le bobine di trasmissione e ricezione della potenza. L'attività di ricerca del gruppo di bioelettromagnetismo del dipartimento SSPT dell'ENEA ha riguardato il progetto di bobine soddisfacenti le specifiche richieste. A questo scopo è stato utilizzato un codice di calcolo che implementa il metodo degli elementi finiti per la simulazione elettromagnetica.

2 Descrizione delle attività svolte e risultati

2.1 Specifiche di progetto

L'analisi eseguita nel corso di questa annualità dall'Università di Padova ha portato alla definizione delle specifiche di massima che il sistema di bobine per il trasferimento dinamico della potenza doveva avere per consentire la trazione di un piccolo veicolo da città senza necessitare dell'ausilio delle batterie. In Figura 1 è mostrato il veicolo scelto per la realizzazione del sistema. Si tratta di un prototipo di microcar ibrida, denominata Urb-E. Le dimensioni e il peso contenuto ne fanno un candidato ideale per la realizzazione di un prototipo di SRDSC di piccola scala che però, opportunamente ridimensionato, possa avere validità anche per auto più grandi.



Figura 1. Prototipo Urb-E

Le caratteristiche fisiche dell'auto sono riportate in Tabella 1

Tabella1. Caratteristiche fisiche del prototipo Urb-E

Lunghezza del veicolo	2100 mm
Carreggiata	1300 mm
Altezza media dal suolo	170 mm
Spazio disponibile sotto il veicolo	1450 x 1150 mm ²
Peso	756 kg

Sulla base di questi dati, delle caratteristiche delle batterie a bordo e della velocità che si è scelta per l'auto nel tratto di carica senza contatto (30 km/h), l'Università di Padova ha definito una topologia di massima del circuito di potenza associato alle bobine di accoppiamento, e un dimensionamento di massima delle bobine stesse (incluse correnti e tensioni applicate). Uno schema della topologia del circuito è mostrato in Figura 2. Le due bobine a terra (track-coil) e a bordo (pick-up coil) hanno la stessa induttanza pari a $L_T = L_P = 45 \mu\text{H}$. La mutua induttanza è $M = 15 \mu\text{H}$, le due capacità sono uguali e pari a $C_P = C_T = 77.9 \text{ nF}$, la struttura LC del sistema a terra è utilizzata come circuito di compensazione della bobina.

Per quel che riguarda la geometria della bobina, è stata scelta la configurazione DD (DD-coil, Figura 2) [4], che, a differenza delle geometrie circolari più tradizionali [16], presenta dei fattori di accoppiamento migliori. In questo modo la distanza tra le bobine può essere aumentata fino anche a 20 cm e la tolleranza a disallineamenti orizzontali aumenta in modo considerevole.

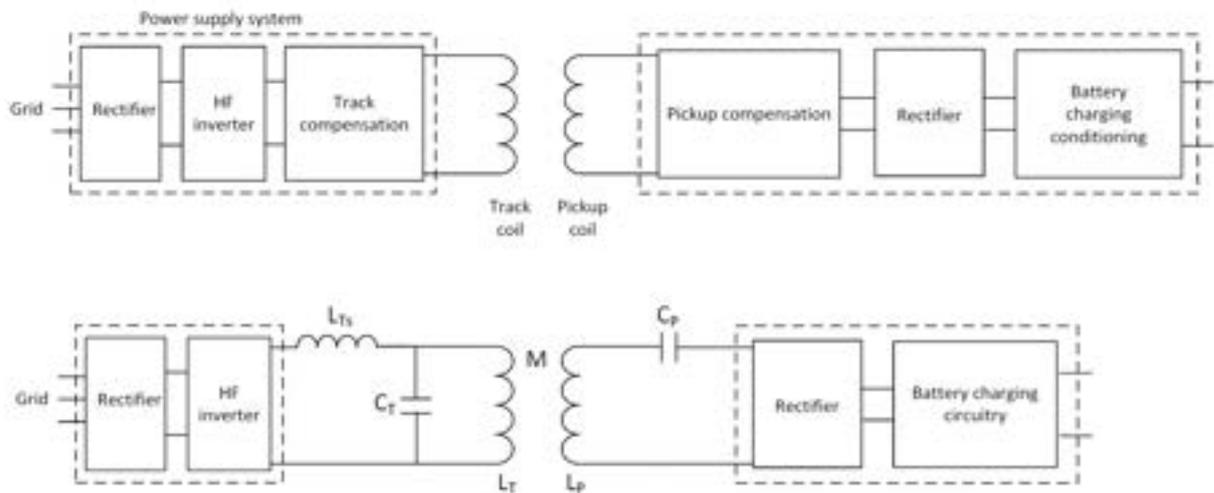


Figura 2. Schema circuitale del STPSC progettato dall'Università di Padova

In questa configurazione, le due bobine che formano la DD-coil, sono collegate in modo tale che la stessa corrente in una parte scorre in senso orario e nell'altra in senso antiorario. L'altra DD-coil sarà alimentata in modo analogo, ma con le correnti che scorrono in verso opposto (Figura 4). In questo modo l'accoppiamento magnetico è possibile su aree maggiori e la distanza tra le bobine può essere aumentata senza compromettere il rendimento del sistema di trasferimento.

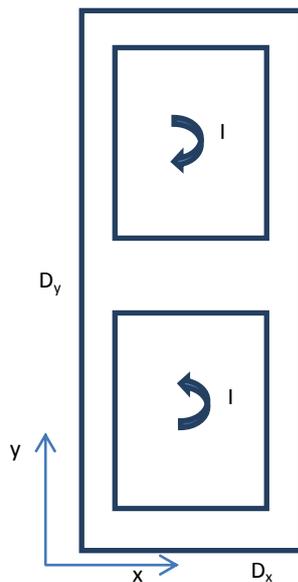


Figura 3. Geometria DD per le bobine

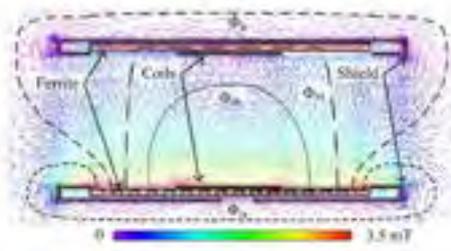


Figura 4. Linee di forza del campo magnetico in una sezione trasversale di un sistema DD: i campi dispersi sono rappresentati da Φ_a , Φ_b , Φ_c il flusso trasmesso è Φ_M [4]

Le bobine co-planari sono poggiate su uno strato di ferriti che migliora la trasmissione del flusso tra una bobina e l'altra e, nel contempo riduce i campi magnetici dispersi.

In Tabella 2 sono riassunte tutte le specifiche che sono state fornite dall'Università di Padova per la realizzazione del progetto

Tabella2. Specifiche del sistema di bobine

Frequenza di lavoro	85 kHz
D_x	336 mm
D_y	950 mm
Distanza tra le bobine	170 mm
$L_T = L_P$	45 μ H
M	15 μ H
I_T	20 A_{rms}
V_T	1030 V_{peak}
I_P	90 A_{rms}
V_P	3000 V_{peak}
L_{Ts}	45 μ H

2.2 Dimensionamento del filo di Litz

L'effetto pelle è il ben noto fenomeno per il quale una corrente elettrica alternata si distribuisce in modo non uniforme all'interno di un conduttore: la densità di corrente è maggiore in superficie e inferiore all'interno. Questo fenomeno diventa consistente alle alte frequenze, comportando un aumento della resistenza elettrica del cavo e, di conseguenza, una maggiore dissipazione di potenza a parità di corrente applicata. Un altro fenomeno dissipativo nei conduttori ad alta frequenza è l'effetto di prossimità. Esso è causato dalla presenza, nelle vicinanze di un conduttore, di una corrente ad elevata frequenza che causa un campo magnetico variabile nel tempo. Questo campo magnetico variabile provoca tensioni indotte e correnti parassite (quindi perdite e interferenze) nei conduttori vicini. Questo fenomeno dipende dalla geometria dei conduttori, dalla frequenza di lavoro e dalla distanza tra i conduttori. Per le applicazioni con frequenza di lavoro superiore al kHz si utilizza il filo di Litz, costituito da numerosi fili di rame isolati tra loro mediante smaltatura. Il diametro del singolo filo dipende dalla frequenza di lavoro: ad 85 kHz la sezione del filo deve essere almeno pari a 38 AWG (American Wire Gauge), che corrisponde a un diametro di 0.101 mm.

Il numero di fili da cui deve essere costituito il filo finale dipende dalla corrente massima che deve trasportare e dalle caratteristiche di realizzazione. Nel caso del sistema in esame, la corrente massima ipotizzabile è $I_P = 90 A_{RMS} = 127 A_{peak}$ (vedi Tabella 2). Per comodità di calcolo, si è assunto che la corrente massima sia pari a 130 A. Poiché la massima densità di corrente possibile all'interno di un filo di rame è pari a $4 A/mm^2$, ne consegue che per un singolo filo, avente sezione pari a 38 AWG, la massima corrente possibile sia pari a 0.0314 A; il numero di fili necessario per il passaggio di 130 A è quindi pari circa a 4000. Dal sito di un produttore (http://www.hsmwire.com/interactive_litz.php) è possibile ricavare tutta una serie di informazioni sulle caratteristiche che il filo deve avere per sostenere le correnti in gioco. In Figura 5 è riportata la schermata che compare quando si ricerca un filo di Litz che sia costituito da 4000 singoli fili di sezione 38 AWG. Nella prima riga compare una possibilità teorica, che implica la formazione di un cavo di diametro di circa 9 mm (0.3619 pollici); nella seconda invece compaiono le caratteristiche di un cavo standard che è costituito da 7200 fili di dimensione 40 AWG, con un diametro nominale finale pari a circa 8 mm (0.3122 pollici). Facendo gli opportuni calcoli, si deduce che un filo di Litz con queste caratteristiche è in grado di sostenere una corrente di 130 A.

AWG	CMA	# of Strands	Strand AWG	Build	Serving	Nominal O.D.	ft/lb	A.C. Resistance (Ω/ft)	D.C. Resistance (Ω/ft)	Frequency
Theoretical wire attributes calculated based on user input.										
2	64000	4000	38	Heavy	Double	0.3619	5	0.00069	0.00018	100KHz
Standard nominal wire attributes with similar specifications.										
2	69192	7200	40	Heavy	Double	0.3122	4	0.00033	0.00017	100KHz

Figura 5. Caratteristiche fisiche ed elettriche dei fili di Litz adeguati a sostenere correnti pari a 130 A

Il filo di Litz è caratterizzato da due parametri fondamentali: la resistenza in corrente continua (R_{DC}) e la resistenza in corrente alternata (R_{AC}). In Figura 5 questi dati sono forniti alla frequenza di 100 kHz; per ottenerne i valori a 85 kHz si utilizza la formula:

$$\frac{R_{AC}}{R_{DC}} = S + k * \left(\frac{ND_1}{D_0}\right)^2 * \left(\frac{D_1 * \sqrt{f}}{10.44}\right)^4 \quad (1)$$

Dove S è funzione della frequenza ed è pari a 1 alla frequenza di interesse, K dipende dal numero di fili ed è pari a 2 sia per 4000 che per 7200, N è il numero di fili, D_1 diametro del singolo filo 'over copper' in pollici, D_0 è il diametro finale del filo 'over copper' in pollici e f la frequenza in Hz. In tabella 3 sono riportati i parametri di interesse per i due fili di Litz rispettanti le specifiche richieste.

Tabella3. Caratteristiche elettriche dei fili di Litz adeguati a sostenere correnti pari a 130 A

Parametro	4000 fili, diametro 9 mm LITZ-custom	7200 fili, diametro 8 mm LITZ-standard
R_{AC}/R_{DC} @ 100 kHz	3.83	1.94
D_0	0.197 pollici	0.286 pollici
R_{DC} @ 85 kHz	0.00018 Ω/ft	0.00017 Ω/ft
R_{AC}/R_{DC} @ 85 kHz	3.05	1.68
R_{AC} @ 85 kHz	0.00055 Ω/ft	0.00029 Ω/ft

Per il progetto delle bobine è stato utilizzato un codice di calcolo che implementa il calcolo agli elementi finiti (FEM) per la simulazione elettromagnetica (CST Microwave Studio). Per semplicità, si è scelto di realizzare il cavo in PEC (perfect electric conductor), tenendo conto delle perdite del filo (vedi R_{AC} in Tabella 3) nella successiva analisi circuitale. Per le simulazioni con il metodo FEM è preferibile utilizzare una griglia (mesh) a tetraedri per la suddivisione dello spazio di calcolo. Per il progetto delle bobine si sono considerati entrambi i fili. Il filo con diametro pari a 9 mm è stato denominato 'LITZ-custom', mentre quello con diametro 8 mm 'LITZ-standard'. In pratica le bobine saranno costituite da angoli curvi; per le simulazioni si è preferito lavorare con angoli retti (Figura 3) per ridurre la complessità del modello, in quanto è stato dimostrato che questa scelta ha un effetto trascurabile sull'accuratezza dei risultati [12]. Per la ferrite si è scelto il tipo N87 con μ pari a 2200, spessore 16 mm e densità 4850 kg/m³.

2.3 Studio di un caso canonico

Per definire i parametri da impostare nel codice FEM, al fine di ottenere una soluzione accurata per il problema elettromagnetico, si è condotta una analisi su un caso canonico, rappresentato da una spirale quadrata di diametro esterno 406 mm; tale configurazione è costituita da 4 avvolgimenti, aventi uno spazio tra le spire pari a 2 mm e spessore del filo pari a 9 e 8 mm (LITZ-custom, LITZ-standard). In Figura 6 sono mostrati i valori di induttanza (L) di una spirale con queste caratteristiche calcolati con diverse approssimazioni [17]. Tutte e tre le espressioni sono accurate, con un errore del 2 – 3%. Lo spessore della spira ha un piccolo effetto sull'induttanza ed è stato ignorato (http://www.circuits.dk/calculator_planar_coil_inductor.htm).

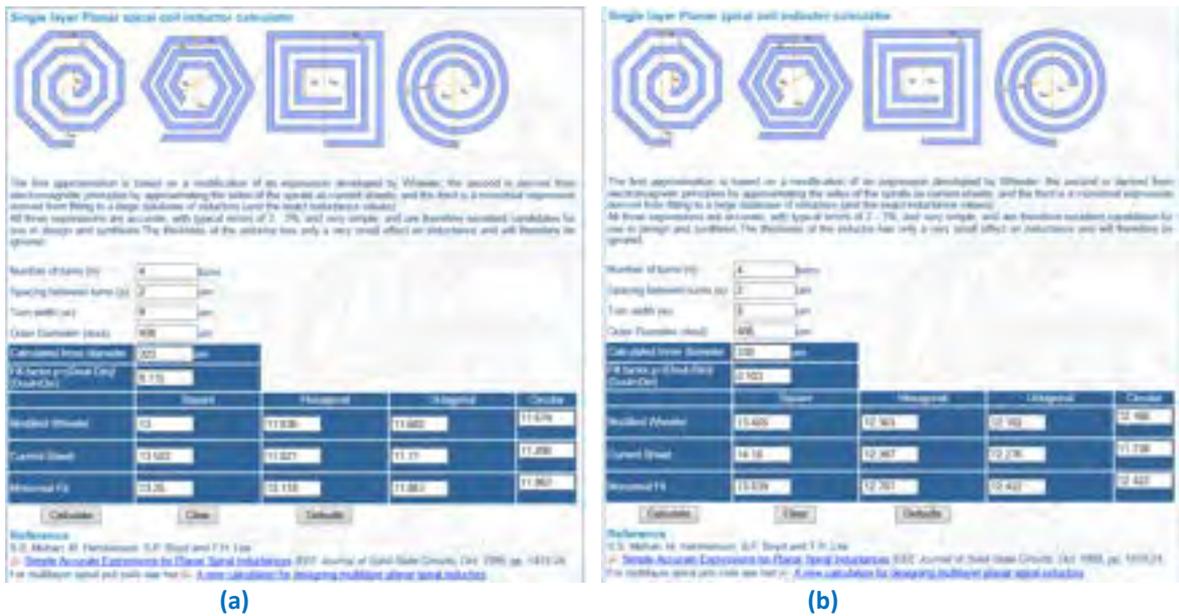


Figura 5. (a) Induttanza per una spirale quadrata con LITZ-custom, (b) Induttanza per una spirale quadrata con LITZ-standard

I valori delle induttanze possono variare tra $13 \leq L \leq 13.5 \mu\text{H}$ per il LITZ-custom e tra $13.5 \leq L \leq 14.2 \mu\text{H}$ per il LITZ-standard, dipendentemente dalle approssimazioni utilizzate.

In Figura 6 è mostrato il modello implementato in CST MW Studio: si è scelto di realizzare una spirale realistica, alimentata opportunamente con una porta in corrente. I parametri della simulazione sono stati scelti in base al migliore compromesso fra accuratezza della soluzione e impegno di calcolo. L’analisi condotta ha determinato che uno spessore per il filo pari a 2 mm è adeguato per ottenere un risultato accurato. La mesh a tetraedri è stata impostata in modo automatico, tranne che per la bobina, dove è stato posto un limite pari a 2 mm per la mesh locale.

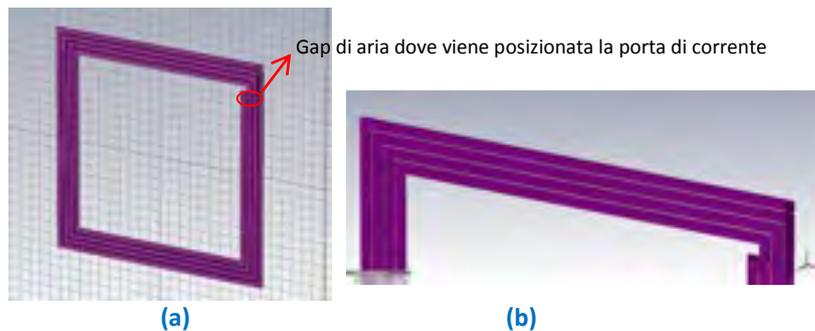


Figura 6. (a) Modello CST MW Studio implementato per la simulazione della bobina quadrata, (b) visione del reticolato di mesh

Con queste impostazioni si ottengono i seguenti valori per le induttanza calcolate:

- L = 13.1 μH con il LITZ-custom
- L = 13.7 μH con il LITZ-standard

confermando la correttezza dei parametri imposti.

2.4 DD-coil

Le scelte di progetto fatte per la realizzazione della DD-coil derivano dalle specifiche definite in Tabella 2 e dai diametri dei due fili di LITZ scelti; le variabili possibili sono le seguenti: il numero di avvolgimenti, la distanza fra i singoli fili di LITZ, la distanza tra la DD-coil, e lo strato di ferrite N87. La distanza fra gli avvolgimenti è stata posta pari a 2 mm; infatti, considerando pari a 1 mm lo spessore di un contenitore per

il filo di Litz, questa assunzione significa considerare, nella pratica, gli avvolgimenti attaccati tra di loro. Le altre due variabili sono state esaminate singolarmente al fine di giungere alla geometria ottimale.

2.4.1 Analisi sul numero di avvolgimenti

Per stabilire il numero di avvolgimenti più adatto al soddisfacimento delle specifiche di Tabella 2, si è esaminato un numero di avvolgimenti pari a 3 e pari a 4 spire per le DD-coil, considerando sia il filo di LITZ-custom che il filo di LITZ-standard. In Figura 7 si può vedere un esempio dei modelli esaminati. Lo strato di ferrite (grigio in figura) è stato posizionato a contatto con le bobine, questa condizione presenta i massimi valori di induttanza (L) e mutua induttanza (M).

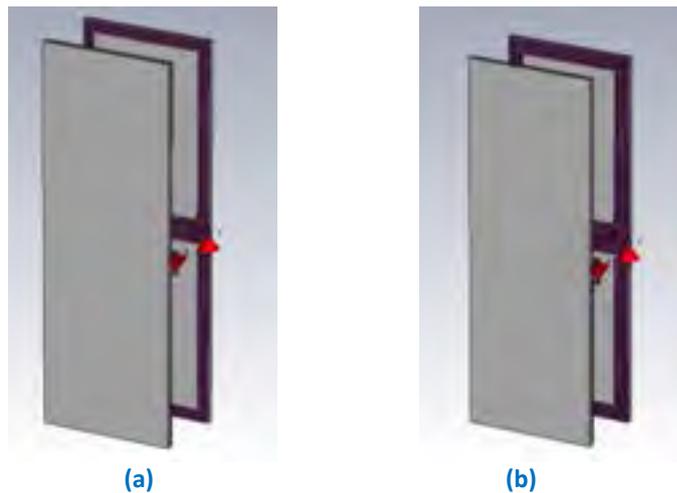


Figura 6. (a) Modello di sistema completo con 3 avvolgimenti, (b) modello di sistema completo con 4 avvolgimenti.

In Tabella 4 sono presentati i risultati finali di questo studio.

Tabella 4: confronto dei valori di induttanza (L) e mutua induttanza (M) ottenuti per i sistemi DD-coil costituiti da 3 e da 4 avvolgimenti

	3 avvolgimenti		4 avvolgimenti	
	LITZ-custom	LITZ-standard	LITZ-custom	LITZ-standard
L [μ T]	34.5	35.8	53.8	56.4
M [μ T]	10.3	10.5	16.7	15.7

E' evidente come i sistemi DD-coil costituiti da tre avvolgimenti presentino dei valori di L e di M troppo bassi e non potranno mai soddisfare le specifiche richieste. D'altro canto i sistemi costituiti da 4 avvolgimenti presentano dei valori ancora alti ma su cui è stato possibile lavorare per ottenere la geometria più adeguata. Per questo motivo la geometria a 4 avvolgimenti è stata scelta per tutte le analisi successive.

2.4.2 Analisi sull'effetto della distanza tra DD-coil e strato di ferriti

In Tabella 5 sono mostrati i risultati delle simulazioni ottenute cambiando la distanza tra DD-coil e ferriti. La distanza 0 mm è il caso ideale, vale a dire considerare il cavo di Litz senza copertura alcuna. Nella realtà, la distanza 1 mm risulta essere la più realistica nel caso in cui le DD-coil siano direttamente appoggiate alle ferriti. Purtroppo, i valori di L e M sono ancora alti rispetto a quelli fissati dalle specifiche. Anche per distanze maggiori, i valori dei parametri delle DD-coil rimangono ancora troppo alti. Alcuni lavori inerenti progetti di bobine a geometria circolare [14] e DD [12] hanno dimostrato che non è necessario uno strato unico di ferriti per ottimizzarne le geometrie, infatti prestazioni simili si possono ottenere con barre di ferrite intervallate da interstizi di aria. Altresì, questa scelta progettuale permette di ridurre sia il peso che i costi di realizzazione delle bobine. Per realizzare le barre si possono utilizzare delle ferriti N87 a forma di I,

dette 'I-core', che misurano 93 mm x 28 mm x 16 mm; tali barre vanno però assemblate in numero intero per evitare variazioni nelle caratteristiche magnetiche dovute al taglio. Distanziando opportunamente tra di loro le barre, è possibile ottenere un aumento del rendimento del sistema e un confinamento del campo magnetico analogo a quello che si otterrebbe utilizzando uno strato unico di ferriti. Nel capitolo successivo si descrivono i risultati dell'analisi eseguita considerando le barre di ferrite al posto dello strato intero.

Tabella 5: valori di L e M ottenuti al variare della distanza fra DD-coil e strato di ferriti

Distanza DD-coil- ferriti [mm]	LITZ-custom L [μH]	LITZ-custom M [μH]	LITZ-standard L [μH]	LITZ- standard M [μH]
0	53.8	16.7	56.4	17.3
1	52.6	16.3	55.1	16.9
2	51.7	16.0	54.6	16.6
3	50.8	15.7	53.2	16.2

2.4.3 Ottimizzazione della geometria con barre di ferrite

In Figura 7 è mostrato un esempio di geometria possibile quando si adottano le barre di ferrite inserite sotto le DD-coil. La distanza reciproca tra le barre, la loro lunghezza e la distanza tra le barre e le DD-coil rappresentano le variabili da ottimizzare.

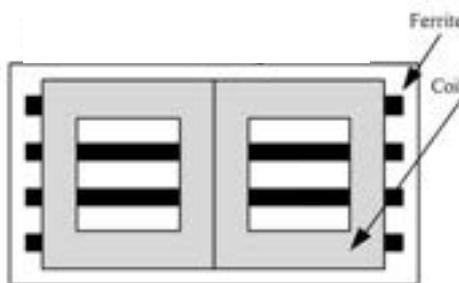


Figura 7. Geometria di una DD-coil assemblata con barre di ferrite

Si sono considerate, quindi diverse geometrie cambiando in modo opportuno lunghezza delle barre e distanza tra di loro, inoltre per ogni geometria si è impostata la distanza tra le DD-coil e il sistema di ferriti pari a 1, 2 e 3 mm. Questa analisi è stata fatta sia con bobine costituite da LITZ-custom che da LITZ-standard.

In Tabella 6 sono presentati tutti i modelli analizzati.

Tabella 6: modelli implementati per l'analisi con le barre di ferriti

Modello	Lunghezza totale delle barre [mm]	Distanza tra le barre [mm]	Numero di mattonelle	Frazione di volume di ferrite rispetto allo strato intero
	93 x 8 = 744	5	56	0.46
		10	48	0.39

	93 x 8 = 744	20	40	0.33
		30	32	0.26
		40	32	0.26
	93 x 9 = 837	5	63	0.51
		10	54	0.44
		20	45	0.37
		30	36	0.29
	93 x 10 = 930	40	36	0.29
		5	70	0.57

	93 x 10 = 930	10	60	0.49
		20	50	0.41
		30	40	0.33
		40	40	0.33
	93 x 10 = 1023	5	77	0.63
		10	66	0.54
		20	55	0.45
		30	44	0.36
		40	44	0.36

Nelle figure successive (Figure 8 - 13) sono mostrati i risultati ottenuti in termini di L e M, utilizzando i modelli di Tabella 6 con i due fili di Litz e variando la distanza tra barre di ferriti e DD-coil.

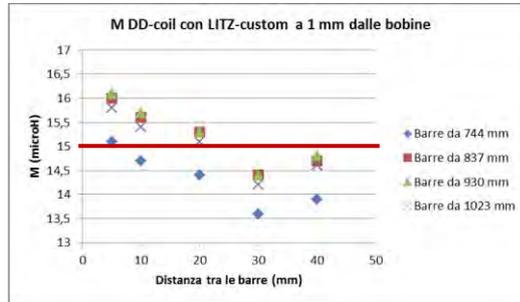
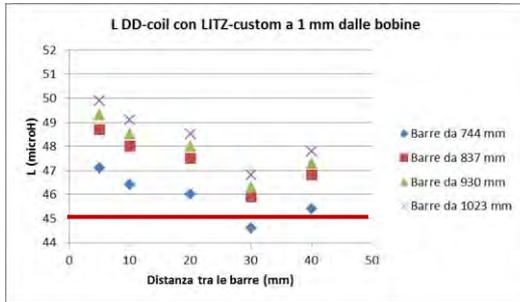


Figura 8: Valori di L e M ottenuti con i modelli costituiti dal filo LITZ-custom e con le barre di ferrite poste a 1 mm dalle DD-coil (in rosso sono evidenziati i valori di L e M presenti nelle specifiche)

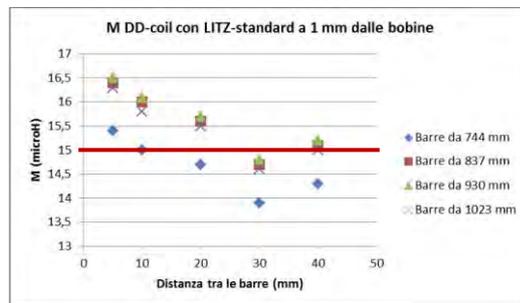
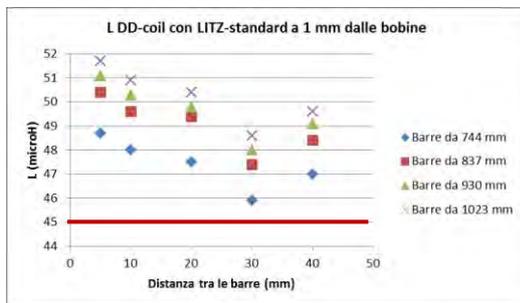


Figura 9: Valori di L e M ottenuti con i modelli costituiti dal filo LITZ-standard e con le barre di ferrite poste a 1 mm dalle DD-coil (in rosso sono evidenziati i valori di L e M presenti nelle specifiche)

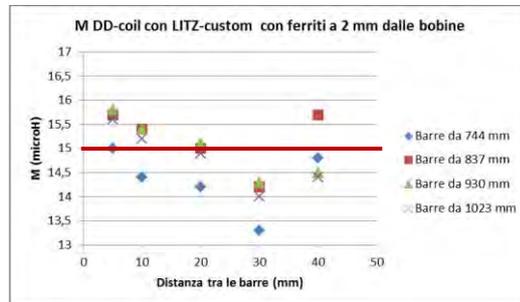
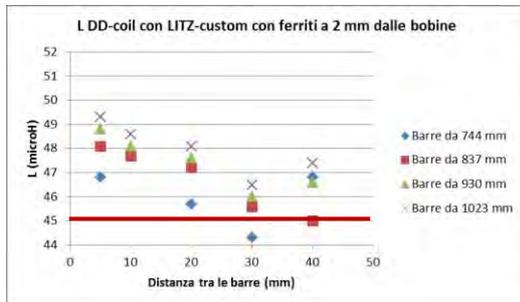


Figura 10: Valori di L e M ottenuti con i modelli costituiti dal filo LITZ-custom e con le barre di ferrite poste a 2 mm dalle DD-coil (in rosso sono evidenziati i valori di L e M presenti nelle specifiche)

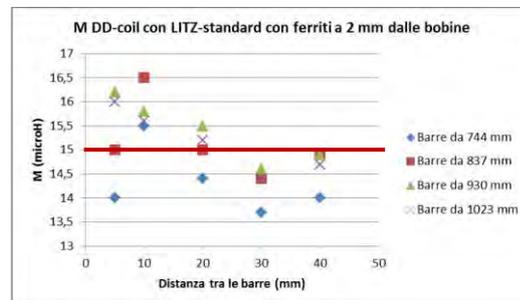
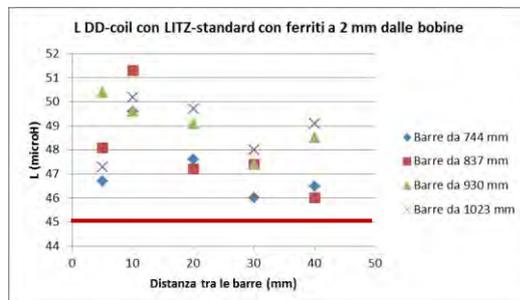


Figura 11: Valori di L e M ottenuti con i modelli costituiti dal filo LITZ-standard e con le barre di ferrite poste a 2 mm dalle DD-coil (in rosso sono evidenziati i valori di L e M presenti nelle specifiche)

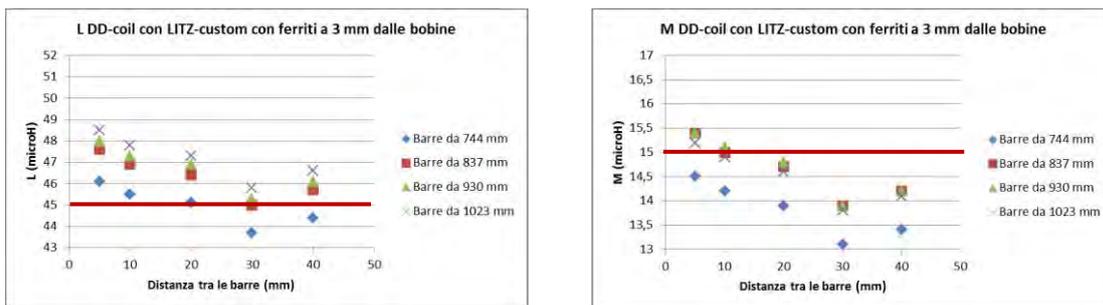


Figura 12: Valori di L e M ottenuti con i modelli costituiti dal filo LITZ-custom e con le barre di ferrite poste a 3 mm dalle DD-coil (in rosso sono evidenziati i valori di L e M presenti nelle specifiche)

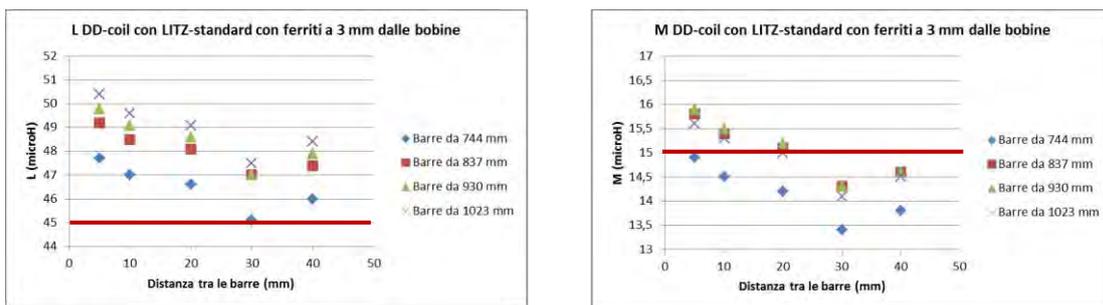


Figura 13: Valori di L e M ottenuti con i modelli costituiti dal filo LITZ-standard e con le barre di ferrite poste a 3 mm dalle DD-coil (in rosso sono evidenziati i valori di L e M presenti nelle specifiche)

2.4.4 Scelta della geometria ottimale

Per scegliere la geometria ottimale si è considerato il sistema di bobine come una rete a due porte (Figura 14), per la quale valgono le seguenti relazioni:

$$V_1 = Z_{11}I_1 + Z_{12}I_2 \tag{2}$$

$$V_2 = Z_{21}I_1 + Z_{22}I_2 \tag{3}$$

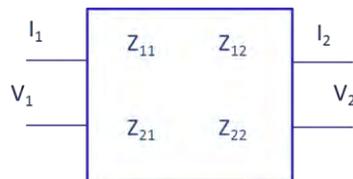


Figura 14: Generica rete a due porte con i parametri che ne descrivono le caratteristiche

Nei modelli di Tabella 6, le DD-coil sono costituite da PEC per cui le equazioni 2 e 3 diventano:

$$V_1 = j\omega LI_1 + j\omega MI_2 = j\omega (LI_1 + MI_2) \tag{4}$$

$$V_2 = j\omega MI_1 + j\omega LI_2 = j\omega (MI_1 + LI_2) \tag{5}$$

Dalle specifiche assegnate $I_1 = 90 A_{RMS}$, $I_2 = 20 A_{RMS}$, $L = 45 \mu H$ e $M = 15 \mu H$, da cui deriva che nel caso ideale $V_1 = 2322 V_{RMS}$ e $V_2 = 1201 V_{RMS}$.

La scelta della geometria ottimale è stata fatta mediante:

- il confronto tra i livelli ‘ideali’ di tensione ai capi delle porte e i livelli ottenuti sostituendo i valori di L e M relativi alle diverse geometrie considerate; da questo confronto vengono scelte solo le geometrie che presentano uno scostamento percentuale inferiore;
- la decisione di considerare solo le geometrie che presentavano valori di M tra 15 e 15.5 μH ;
- la scelta di quelle che avevano il numero minori dei ferriti, per una ottimizzazione del peso.

L’analisi sul sistema completo (tre bobine a terra e una bobina che scorre sopra) è stata quindi condotta su:

1. il sistema costituito dal filo di LITZ-custom con 6 barre di ferrite lunghe 930 mm, distanziate tra di loro di 10 mm e poste a 3 mm dalle DD-coil;
2. il sistema costituito dal filo di LITZ-standard con 5 barre di ferrite lunghe 832 mm, distanziate tra di loro di 20 mm e poste a 3 mm dalle DD-coil.

2.5 Analisi del sistema completo

Il sistema completo analizzato consiste di tre DD-coil a terra (truck coils) distanziate tra di loro di 2 mm (tenuto conto dello spessore del contenitore del filo di Litz, di fatto è come considerare che siano attaccate). La DD-coil a bordo (pick-up coil) è stata fatta scorrere sopra le tre bobine a terra con passi discreti di 50 mm: il numero totale delle simulazioni eseguite per ogni analisi è stato pari a 28.

In Figura 15 è mostrato il modello, costituito dal filo di LITZ-custom, scelto ed utilizzato per l'analisi sul sistema completo.

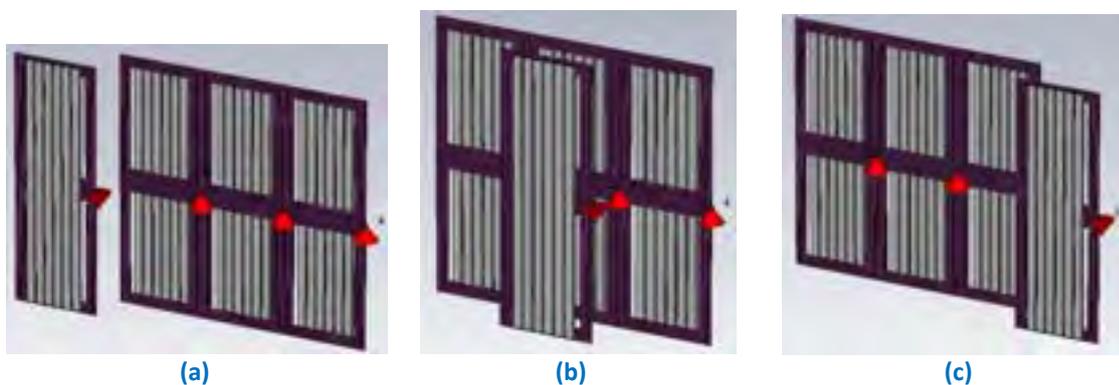


Figura 15: geometria dell'analisi del sistema completo (LITZ-custom) costituito da tre DD-coil a terra e una DD-coil che scorre sopra a passi discreti: (a) passo iniziale, (b) passo centrale, (c) passo finale

In Figura 16 è mostrato l'andamento delle mutue induttanze M generate tra le tre truck coils (denominate 1, 3 e 4) e la pick-up coil (denominata 2). Come si può vedere il valore di M rimane compreso tra circa $9 \mu\text{H}$ e $15 \mu\text{H}$ per tutto lo spostamento, garantendo il desiderato trasferimento di potenza fra le DD-coil a terra e quella a bordo.

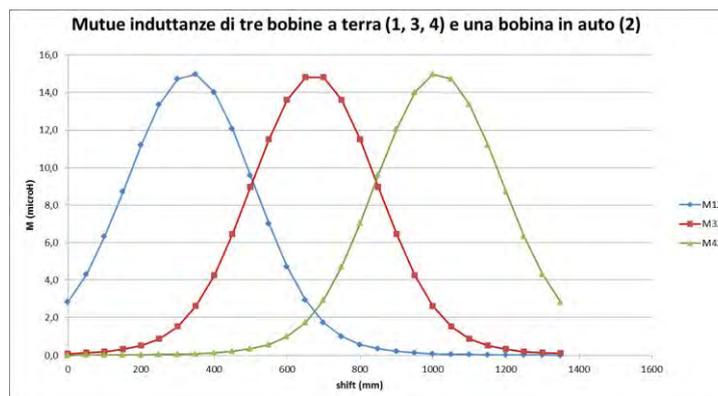


Figura 16: andamento di M (LITZ-custom) in funzione dello spostamento della DD-coil a bordo rispetto alle tre a terra

In Tabella 7 sono mostrati i valori delle induttanze delle 4 bobine e le loro variazioni dovute allo scorrimento della pick-up coil rispetto a quelle a terra. Come si può osservare le induttanze delle DD-coil sono uguali a parte la fisiologica variazione legata allo scorrimento di una (la numero 2) sulle altre.

Tabella 7: valori delle induttanze delle 4 DD-coil LITZ-custom (la numero 2 è la pick-up coil) durante lo spostamento

L1 [μH]	L2 [μH]	L3 [μH]	L4 [μH]
44.7±1.3	46.4±1.1	44.7±1.3	44.7±1.3

In Figura 17 è mostrato, invece, il modello, costituito dal filo di LITZ-standard, scelto ed utilizzato per l’analisi sul sistema completo. In Figura 18 è mostrato l’andamento delle mutue induttanze M generate tra le tre truck coils (denominate 1, 3 e 4) e la pick-up coil che scorre sopra (denominata 2). Come si può vedere dalla figura, si possono trarre considerazioni sull’andamento del valore di M analoghe al caso precedente.

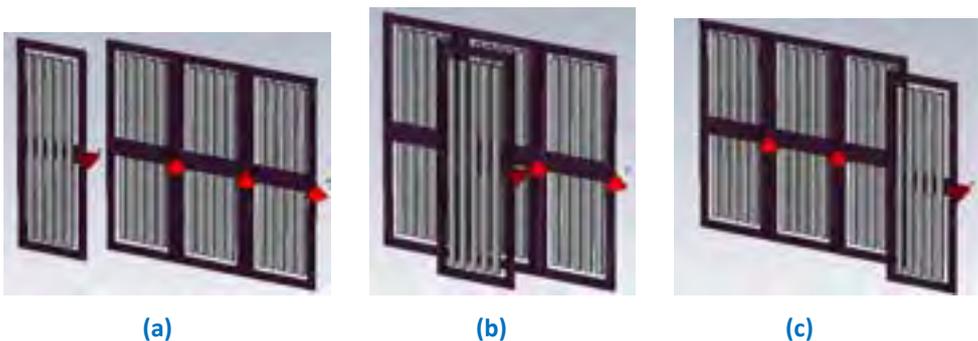


Figura 17: geometria dell’analisi del sistema completo (LITZ-standard) costituito da tre DD-coil a terra e una DD-coil che scorre sopra a passi discreti: (a) passo iniziale, (b) passo centrale, (c) passo finale

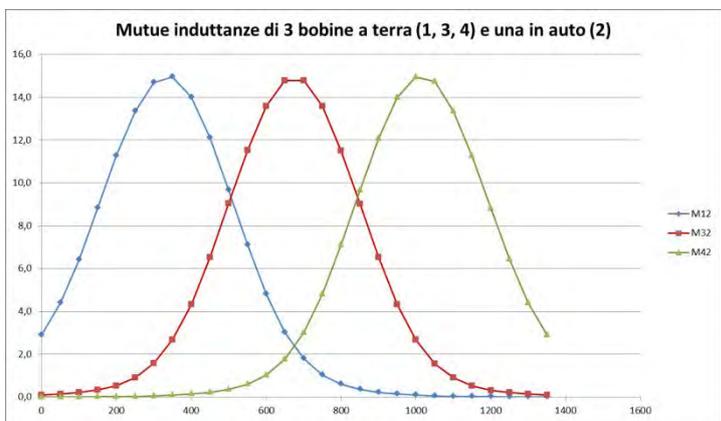


Figura 18: andamento di M (LITZ-standard) in funzione dello spostamento della DD-coil a bordo rispetto alle tre a terra

Analogamente a quanto detto nel caso precedente, si può concludere che le induttanze delle quattro DD-coil sono uguali a parte la fisiologica variazione legata allo scorrimento di una (la numero 2) sulle altre (Tabella 8)

Tabella 8: valori delle induttanze delle 4 DD-coil LITZ-standard (la numero 2 è la pick-up coil a bordo) durante lo spostamento

L1 [μH]	L2 [μH]	L3 [μH]	L4 [μH]
45.1 ± 1.8	47.1 ± 1.2	45.3 ± 1.5	45.2 ± 1.5

2.5.1 Analisi circuitale del sistema LITZ-custom

In Figura 19 è mostrato lo schema circuitale del sistema quando viene messo in risonanza mediante una capacità in parallelo in ingresso e una capacità seriale in uscita (vedasi Figura 2).

Le resistenze in serie pari a 0.01Ω rappresentano le R_{AC} del filo di Litz che, nel caso della singola DD-coil realizzata con LITZ-custom, ha una lunghezza totale di 11.98 m.

Le due capacità sono state calcolate per essere in risonanza con delle induttanze pari a $47.3 \mu\text{H}$:

$$C = 1/(\omega^2 L) = 74.1 \text{ nF}$$



Figura 19: schema circuitale di risonanza del sistema LITZ-custom

In Figura 20 sono mostrati gli andamenti della parte reale e immaginaria delle impedenze Z_{11} e Z_{12} . La risonanza è evidente nel picco ad 85 kHz della parte reale e nell'inversione di fase alla stessa frequenza della parte immaginaria

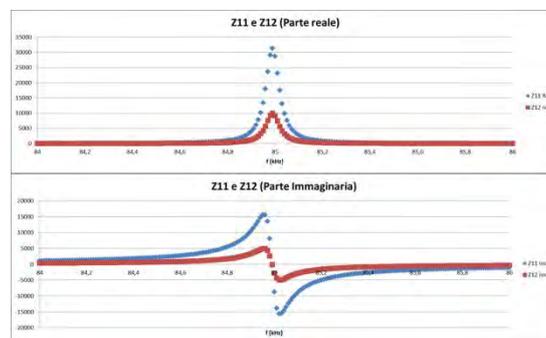


Figura 20: andamento della parte reale e della parte immaginaria di Z_{11} e Z_{12} al variare della frequenza, per il sistema costituito da LITZ-custom

2.5.2 Analisi circuitale del sistema LITZ-standard

In Figura 21 è mostrato lo schema circuitale del sistema costituito da LITZ-standard. Anche in questo caso la risonanza è ottenuta con una capacità in parallelo in ingresso e una capacità in serie in uscita.

In questo caso le resistenze R_{AC} del filo di Litz in serie sono pari a 0.005Ω e le due capacità di risonanza sono pari a 72.9 nF

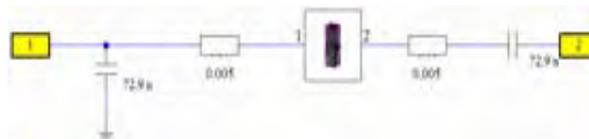


Figura 21: schema circuitale di risonanza del sistema LITZ-standard

Analogamente al caso precedente in Figura 22 sono mostrati gli andamenti della parte reale e immaginaria delle impedenze Z_{11} e Z_{12} . Anche in questo caso è evidente la condizione di risonanza ad 85 kHz.

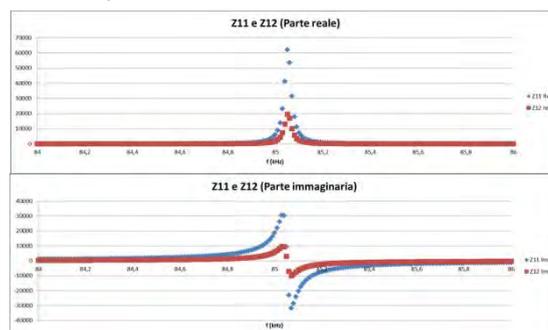


Figura 22: andamento della parte reale e della parte immaginaria di Z_{11} e Z_{12} al variare della frequenza per il sistema costituito da LITZ-standard

3 Conclusioni

Le attività di ricerca svolte dal gruppo di bioelettromagnetismo della Divisione Tecnologie e metodologie per la salvaguardia della salute (SSPT-TECS) durante l'annualità 2015-2016, nell'ambito dell'Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico – ENEA, hanno riguardato la progettazione di un sistema di bobine per la ricarica dinamica senza contatto. Le specifiche delle bobine sono state fornite dall'Università di Padova, che nel corso di questa annualità ha analizzato le caratteristiche operative, funzionali e progettuali dei sistemi a ricarica dinamica senza contatto operanti ad 85 kHz. In tali sistemi di ricarica il trasferimento della potenza senza contatto è possibile grazie a delle bobine di trasmissione e ricezione. La geometria ottimale delle bobine, identificata per questo tipo di applicazione, è quella DD [4], grazie alla quale è possibile ottenere un accoppiamento magnetico su aree maggiori rispetto ad altre geometrie (ad esempio circolari) nonché aumentare la distanza tra le bobine senza compromettere il rendimento del sistema di trasferimento.

Per il progetto delle bobine è stato utilizzato un codice di calcolo per la simulazione elettromagnetica che implementa il metodo degli elementi finiti.

In una prima fase dell'attività si è analizzato il dimensionamento del filo di Litz da utilizzare, in funzione delle correnti in gioco (circa 130 A di corrente massima sulla bobina di trasmissione). È stato possibile identificare due tipi di fili che soddisfano le specifiche richieste: un filo è realizzato con caratteristiche ad-hoc ed è stato denominato LITZ-custom; l'altro è, invece, un filo standard e per questo denominato LITZ-standard. Ai fini progettuali, la differenza sostanziale fra i due fili è lo spessore, pari a 9 mm per il LITZ-custom e pari a 8 mm per il LITZ-standard. Il passo successivo è stato trovare il numero di avvolgimenti in grado di fornire valori di induttanza e mutua induttanza prossimi a quelli delle specifiche. Uno studio specifico è stato condotto sullo strato di ferriti utilizzato in questo tipo di strutture per migliorarne il rendimento e diminuire l'intensità dei campi elettromagnetici dispersi nel volume circostante. È stato dimostrato [4], [16] che per ottenere geometrie ottimali non è necessario uno strato unico di ferriti; infatti, prestazioni simili si possono ottenere con barre di ferrite intervallate da interstizi di aria. Per realizzare questo si utilizzano delle mattonelle di ferrite a forma di I (93 mm x 28 mm x 16 mm) opportunamente assemblate. La ricerca della geometria ottimale ha richiesto la realizzazione di diversi modelli, ottenuti variando l'altezza delle barre, la loro distanza reciproca e la distanza del sistema di barre dalle DD-coil. Alla fine si sono trovate due strutture ottimali, una realizzata con filo di LITZ-custom e l'altra realizzata con filo di LITZ-standard. Con queste due strutture è stata eseguita l'analisi dell'intero sistema, costituito da tre bobine a terra (truck coils) affiancate tra di loro, e una bobina in aria (detta pick-up coil) che scorre sopra di esse. I parametri identificati per l'analisi sono gli andamenti delle mutue induttanze tra pick-up coil e truck coils al variare dello scorrimento reciproco. Si è potuto vedere come la mutua induttanza complessiva non sia mai inferiore a 9 μ H, permettendo quindi di avere un trasferimento di potenza per ogni punto dello scorrimento. Anche le induttanze dei singoli sistemi DD-coil rimangono invariate, a meno di minime fluttuazioni dovute alla variazione della geometria, posizione per posizione. Infine, è stata condotta l'analisi circuitale dei due sistemi prescelti, identificando e quantificando i parametri circuitali che ne rendono possibile il funzionamento in condizioni di risonanza alla frequenza di 85 kHz.

Questo studio ha consentito di progettare due sistemi per la ricarica senza contatto rispettanti le specifiche richieste. Il passo successivo sarà la realizzazione del prototipo e la conferma sperimentale dei dati numerici.

4 Riferimenti bibliografici

1. ICNIRP (International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection), "Guidelines for limiting exposure to time-varying electric and magnetic fields (1 Hz to 100 kHz)," *Health Phys.*, vol. 99, (2010), pp. 818–836.
2. Raccomandazione del Consiglio dell'Unione europea del 12 luglio 1999, pubblicata nella G.U.C.E. n. 199 del 30 luglio 1999.
3. DPCM 8 luglio 2003 'Fissazione dei limiti di esposizione, dei valori di attenzione e degli obiettivi di qualità per la protezione della popolazione dalle esposizioni ai campi elettrici e magnetici alla frequenza di rete (50 Hz) generati dagli elettrodotti', GU Serie Generale n.200 del 29-8-2003.

4. M. Budhia, J. T. Boys, G. A. Covic, and C.-Y. Huang, "Development of a single-sided flux magnetic coupler for electric vehicle IPT charging systems," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 60, no. 1, (2013), pp. 318–328.
5. J. R. Bish, and G. P. Tietmeyer, "Electric vehicle field test experience," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 32, no. 1, (1983), pp. 81–89.
6. Y. Cheng, R. Trigui, C. Espanet, A. Bouscayrol, and S. Cui, "Specifications and design of a PM electric variable transmission for Toyota Prius II," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 60, no. 9, (2011), pp. 4106–4114.
7. F. L. Mapelli, D. Tarsitano, and M. Mauri, "Plug-in hybrid electric vehicle: Modeling, prototype, realization, and inverter losses reduction analysis," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 57, no. 2, (2010), pp. 598–607.
8. M. Takagi et al., "Economic value of PV energy storage using batteries of battery-switch stations," *IEEE Trans. Sustain. Energy*, vol. 4, no. 1, (2013), pp. 164–173.
9. S. Y. Choi, B. W. Gu, S. Y. Jeong, and C. T. Rim, "Advances in Wireless Power Transfer Systems for Roadway-Powered Electric Vehicles", *IEEE J. Emerg. Select. Topics Power Electron.*, vol. 3, no. 1, (2015), pp. 18-36.
10. J. G. Bolger, "Roadway power and control system for inductively coupled transportation system," U.S. Patent 4 836 344, Jun. 6, 1989.
11. K. W. Klontz, D. M. Divan, D. W. Novotny, and R. D. Lorenz, "Contactless battery charging system," U.S. Patent 5 157 319, Oct. 20, 1992.
12. K. W. Klontz, D. M. Divan, D. W. Novotny, and R. D. Lorenz, "Contactless power delivery system for mining applications," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 31, no. 1, (1995).
13. J. Huh, S. W. Lee, W. Y. Lee, G. H. Cho, and C.-T. Rim, "Narrow-width inductive power transfer system for on-line electrical vehicles (OLEV)," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 26, no. 12, (2011), pp. 3666–3679.
14. G. A. Covic and J. T. Boys, "Modern trends in inductive power transfer for transportation applications," *IEEE J. Emerg. Sel. Topics Power Electron.*, vol. 1, no. 1, (2013), pp. 28–41.
15. S. Y. Choi, B. W. Gu, S. Y. Jeong, and C.-T. Rim, "Ultra-slim S-type inductive power transfer system for roadway powered electric vehicles," *IEEE Transactions on Power Electron.*, vol.30, no. 11, (2015), pp. 6456 – 6468.
16. M. Budhia, G. A. Covic, and J. T. Boys, "Design and optimization of circular magnetic structures for lumped inductive power transfer systems", *IEEE Transactions on Power Electron.*, vol.26, no. 11, (2011), pp. 3096 – 3108.
17. S.S. Mohan, M. Hershenson, S.P. Boyd and T.H. Lee "Simple Accurate Expressions for Planar Spiral Inductances" *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, vol. 34, no. 10, (1999), pp. 1419-24.

5 Abbreviazioni ed acronimi

SRDSC: sistemi di ricarica dinamica senza contatto

STPSC: sistemi per il trasferimento di potenza senza contatto.

OLEV: on-line electric vehicle

PEC: perfect electric conductor